

На правах рукописи



БАЛДАНОВ АЛДАР БАТОМУНКУЕВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ УДАРЕ**

Специальность 1.1.8.

Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», г. Улан-Удэ.

- Научный руководитель:** **Бохоева Любовь Александровна**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и прикладная механика» ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»
- Официальные оппоненты:** **Матвиенко Юрий Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом «Прочность, живучесть и безопасность машин» ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благодногова Российской академии наук»
Хомченко Антон Васильевич, кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор отдела динамической прочности Общества с ограниченной ответственностью «АУРУС-АЭРО»
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ)

Защита диссертации состоится «14» января 2026 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.07 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4. и на сайте МАИ:

https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=185914

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Д. О. Сердюк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

При эксплуатации композитные конструкции подвергаются случайным локальным ударным нагрузкам. Их можно разделить на несколько типов, между которыми нет четкой границы, – низкоскоростные, высокоскоростные, гиперскоростные удары (град, гравий, удары при изготовлении и эксплуатации и т. д.). Сложность процессов разрушения многослойных композиционных материалов (КМ), нелинейные деформации, быстропротекающие ударные процессы – все это затрудняет анализ результатов экспериментальных исследований. При этом нет возможности регистрировать динамику самого процесса. В связи с этим возрастает потребность в аналитических и численных методах, позволяющих выполнять достоверный анализ динамических процессов деформирования, повреждения и разрушения многослойных элементов конструкций при ударных воздействиях. Наиболее критичным типом разрушения при ударном воздействии является расслоение – нарушение контакта между слоями КМ. Формируемые скрытые повреждения существенно ухудшают остаточную прочность элементов конструкции, в особенности при сжатии вдоль слоев, поэтому методика их предсказания и анализа требует дальнейшей разработки. Одним из путей решения этой проблемы является разработка методов расчета на прочность тонкостенных элементов конструкций, позволяющих прогнозировать появление и последующий рост расслоения, учитывать геометрию зоны дефекта, структуру композита с учетом механических характеристик материала. Отдельной проблемой является выявление и оперативная диагностика повреждений. Для конструкций из КМ данная проблема остается недостаточно изученной. Применение методов и средств распознавания дефектов может показать реальную картину достоверной оценки размеров и глубины залегания расслоений после ударной нагрузки.

В работе рассмотрены сочетание натурных экспериментов деформирования и разрушения многослойных КМ при ударе с использованием

сверхскоростной камеры и численного моделирования, позволяющего исследовать процесс повреждений.

Таким образом, актуальность данной работы обусловлена необходимостью применения комплексного экспериментального и численного исследования элементов конструкций из многослойных КМ, направленного на выявление физической картины процессов, протекающих как в материале, так и в элементах конструкции при динамических нагрузках.

Цель диссертационной работы – моделирование процессов деформирования, повреждения, разрушения тонкостенных элементов конструкций из слоистых КМ при ударном нагружении с использованием разработанных численных и экспериментальных методик.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

1. Провести экспериментальное исследование процессов деформирования, повреждения, разрушения пластин при низко- и высокоскоростном ударе для разработки виртуальных испытаний элементов конструкций.

2. Разработать расчетно-экспериментальную методику оптимального армирования многослойных КМ для снижения скорости пробития пластины ударником.

3. Разработать методику аналитического расчета критических и разрушающих нагрузок тонкостенных пластин из слоистых КМ с дефектами типа расслоений, полученными в результате ударного нагружения.

4. Провести оценку площади, размеров и глубину залегания расслоений в пластине из многослойных КМ после ударной нагрузки диагностическими и численными методами.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовались метод конечных элементов, экспериментальные методы исследования, методы механики

разрушения, классические подходы и методы механики деформированного твердого тела, методы механики КМ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Проведен цикл испытаний пяти-, десяти- и двадцатислойных пластин из КМ с различной ориентацией укладки армирующих слоев при низко- и высокоскоростном ударе и получены новые опытные данные. Разработана методика виртуальных испытаний пластин из многослойных КМ при взаимодействии с высокоскоростными ударниками на основе численного моделирования и экспериментального исследования.

2. Разработана методика оптимального армирования многослойных КМ для снижения скорости пробития пластины ударником. Скорость пробития уменьшается за счет увеличения площади межслойных дефектов в материале. Предложенный подход продемонстрирован на конкретных примерах проектирования пластин.

3. Разработана методика нелинейного расчета критических и разрушающих сил для слоистых КМ с дефектами типа расслоений, образованными после удара. Определены жесткостные характеристики многослойных КМ по известным характеристикам армирующих элементов и связующего.

4. Сделана комплексная оценка площади, размеров и глубины залегания расслоений после ударной нагрузки ультразвуковой дефектоскопией, численным моделированием.

Достоверность результатов в работе подтверждается применением общих подходов и методов механики КМ, выполнением расчетов методом конечных элементов, а также проведением большого количества вычислительных экспериментов и их сравнением с экспериментальными результатами исследований.

Практическая ценность заключается в возможности использования методики виртуальных испытаний элементов конструкций и изделий из многослойных КМ при ударных нагрузках в испытательных лабораториях на

предприятиях: ОАО «Улан-Удэнский авиационный завод», ЗАО «Улан-Удэнский лопастной завод», ООО «Предприятие “Аэротех”», ОАО «Улан-Удэнское приборостроительное производственное объединение», ОАО «Улан-Удэнский авиаремонтный завод» и другие. Результаты работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Информационные технологии и прикладная механика» ВСГУТУ.

На защиту выносятся следующие положения диссертации:

1. Результаты цикла испытаний 5-, 10- и 20-слойных пластин из КМ с различной ориентацией укладки армирующих слоев при низко- и высокоскоростном ударе, получены новые опытные данные. Методика виртуальных испытаний элементов конструкций из многослойных КМ при взаимодействии с высокоскоростными ударниками, разработанная на основе комплексного экспериментального исследования и численного моделирования.

2. Новый подход к оптимизации армирования многослойных КМ, основанный на автоматизированной процедуре выбора угла укладки волокон в слое. При оптимальном армировании скорость пробития уменьшается за счет увеличения площади межслойных дефектов в материале.

3. Методика решения задачи устойчивости и процесса разрушения для определения критической и разрушающей нагрузок многослойной сжатой пластины из КМ с межслойными дефектами, полученными при взаимодействии пластины с высокоскоростными ударниками.

4. Результаты комплексного исследования внутреннего расслоения образцов с предварительно ударным повреждением и изучение влияния площади внутреннего расслоения на скорость ударника диагностическими и численными методами.

Личный вклад соискателя. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором и при его непосредственном участии. В частности, в работах [1-4] автор

участвовал в проведении натурного эксперимента на всех этапах, включая изготовление образцов из КМ, проведение испытаний на ударное нагружение и анализ полученных результатов. В работах [1-4, 6, 7, 10-12, 16-35] автором разработаны и верифицированы конечно-элементные модели в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA для анализа процесса разрушения КМ при различных нагрузках. В работах [8, 9] автором разработана автоматизированная процедура выбора угла укладки волокон в системе ANSYS для оптимизации обшивки БПЛА. В работах [2, 5] совместно с соавторами получены аналитические выражения для критических нагрузок расслоения и разработана методика численного моделирования закритического поведения КМ с дефектами в ANSYS Mechanical.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были изложены на научных семинарах кафедр «Информационные технологии и прикладная механика» и «Технологии машиностроения» ВСГУТУ; на научных всероссийских и международных конференциях, выставках и семинарах, таких как международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (ТГАСУ, г. Томск, 2018), XV Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (ОмГТУ, г. Омск, 2019), региональная конференция «iPolytechConference» (ИрНИТУ г. Иркутск, 2022), XV Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (г. Омск, 2021), VIII Международная конференция «Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ, 2022), VI Международная научно-техническая конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение» ЖИВКОМ-2022 (г. Москва), XVI Международная научно-практическая конференция «Современные авиационные технологии» (ИрНИТУ, г. Иркутск, 2023), XVIII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (МРДМК-2024, ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург), XXXVI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения («МИКМУС-2024» ИМАШ РАН, г. Москва). В 2020 г. на XVII

Международной конференции CADFEM/ANSYS данный проект с результатами исследования и разработки элементов конструкций из КМ для беспилотной авиационной системы признан лучшим в отраслевой секции.

Основные публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 35 научных работ, из них 5 индексируются базами данных Scopus/WOS, 7 статей - в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК Минобрнауки России (из них 4 по специальности 1.1.8.), 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 патент на полезную модель, остальные 20 – в прочих публикациях.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации изложен на 182 страницах машинописного текста, включая 121 рисунок и 36 таблиц и 3 приложения. Библиография работы содержит 203 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертационного исследования, научная новизна, практическая значимость, достоверность и приведены данные по апробации результатов, краткое содержание работы по главам.

В первой главе проанализированы теоретические и экспериментальные работы отечественных и зарубежных авторов по следующим направлениям: разрушения многослойных КМ при ударных воздействиях и возможные типы образуемых повреждений; особенности применения методик проведения виртуальных испытаний и оптимального моделирования многослойных КМ; анализ условий устойчивости и разрушения тонкостенных элементов конструкций из слоистых КМ с дефектами типа расслоений после ударного нагружения; диагностические методы обнаружения межслойных дефектов после ударной нагрузки.

Существует значительное количество работ с определением процесса разрушения и процессов деформирования КМ при ударе. Большой вклад в

развитие этого направления внесли известные ученые: Б. С. Сапожников, Н. А. Абросимов, А. Н. Аношкин, В. Н. Аптуков, А. М. Брагов, В. Э. Вильдеман, Ю. Г. Матвиенко, С. Т. Милейко, А. Л. Медведский, О. Б. Наймарка, А. Н. Полилов, Е. Ф. Харченко и многие другие. Быстропротекающие процессы разрушения многослойных КМ при ударных нагрузках затрудняют интерпретацию экспериментальных данных. В связи с этим возрастает роль применения расчетных методов, в частности, метод конечных элементов при решении таких задач.

Во второй главе проведены экспериментальные исследования процессов деформирования, повреждения, разрушения пластин при низко- и высокоскоростном ударе. На основе полученных экспериментальных данных разработана методика виртуальных испытаний. Достоверность результатов виртуальных испытаний определена исходя из результатов экспериментального исследования, методов численного моделирования и высокоскоростной видеосъемки. Объектами для виртуальных испытаний служат цифровые двойники — многослойные пластины при взаимодействии с высокоскоростными ударниками. Проведены экспериментальные исследования для многослойных пластин из 5, 10, 20 слоев с разной укладкой волокон в слое при низко- и высокоскоростном ударе. Образцы были изготовлены при температуре 20–22° С по ГОСТу 33347-2015 из стеклоткани с эпоксидным связующим марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) и отвердителем ПЭПА (ТУ 2413-357-0203447-99) под давлением 50 кг/см² и выдержкой -7 дней (рис.1). Образцы после испытания представлены на рисунке 2. Процесс испытания пластин снимали высокоскоростной камерой со скоростью 150 тыс. кадров в секунду.

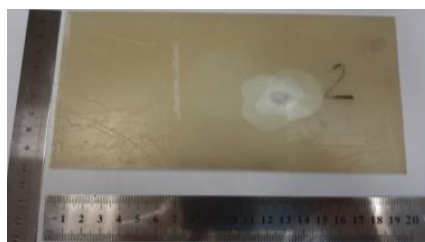


Рисунок 1 – Образцы до испытаний

Рисунок 2 – Образцы после испытания

При проверке достоверности расчетных моделей использовали следующие результаты экспериментальных исследований: определение скорости ударника в любой момент времени, покадровое изображение дефектов при взаимодействии многослойной композиционной пластины с высокоскоростными ударниками, размеры и площади области повреждений образцов после испытаний (вдоль и поперек пластины).

Моделирование процессов деформирования и разрушения многослойных пластин из стеклоткани при низко-и высокоскоростных ударах получено в программе LS-DYNA v195. Получены результаты численных расчетов для многослойных пластин из 5, 10, 20 слоев с разной укладкой волокон в слое при низкоскоростном (180–380 м/с) и высокоскоростном ударе (800–1200 м/с). В образцах из 5 слоев с разной укладкой волокон от удара формируются микротрещины, затем – сквозные повреждения с расслоениями. В образцах из 10 и 20 слоев первые 2–3 слоя пробиваются, повреждения имеют конусообразный вид, а в момент окончательного взаимодействия пластины и ударника появляются межслойные дефекты (расслоения).

Получены следующие результаты численного моделирования: скорость ударника в любой момент времени, зависимость напряжения в слое от времени (рис. 3), модели межслойных дефектов при разных скоростях ударника. При совмещении всех слоев результат моделирования на 97% совпадает с экспериментом. На рисунке 4 представлены результаты численного расчета и экспериментального исследования скорости ударника от времени (сходимость в пределах 10–15%). Получены численные значения скорости ударника до и после пробития пластины, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами

В таблице 1 представлен покадровый анализ дефектов с тыльной стороны пластины. Установлено, что размеры внутренних экспериментальных повреждений пластины, снятые высокоскоростной камерой, совпадают на 95–98% с численными моделями. Сделан сравнительный анализ области

повреждений по длине и ширине образцов после испытаний и определены размеры отверстий и деформация слоев после пробития (рис. 5).

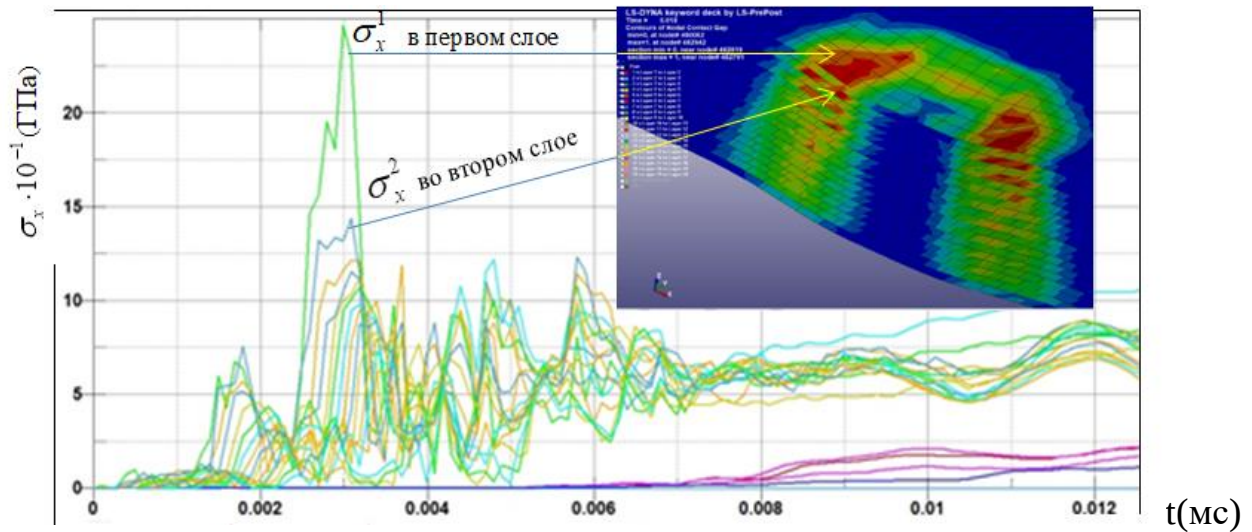


Рисунок 3 – Зависимость напряжения (ГПа) от времени (мс) в слое 20-слойной пластины из стеклопластика $[0,90]_{10}$ (скорость удара 884 м/с)

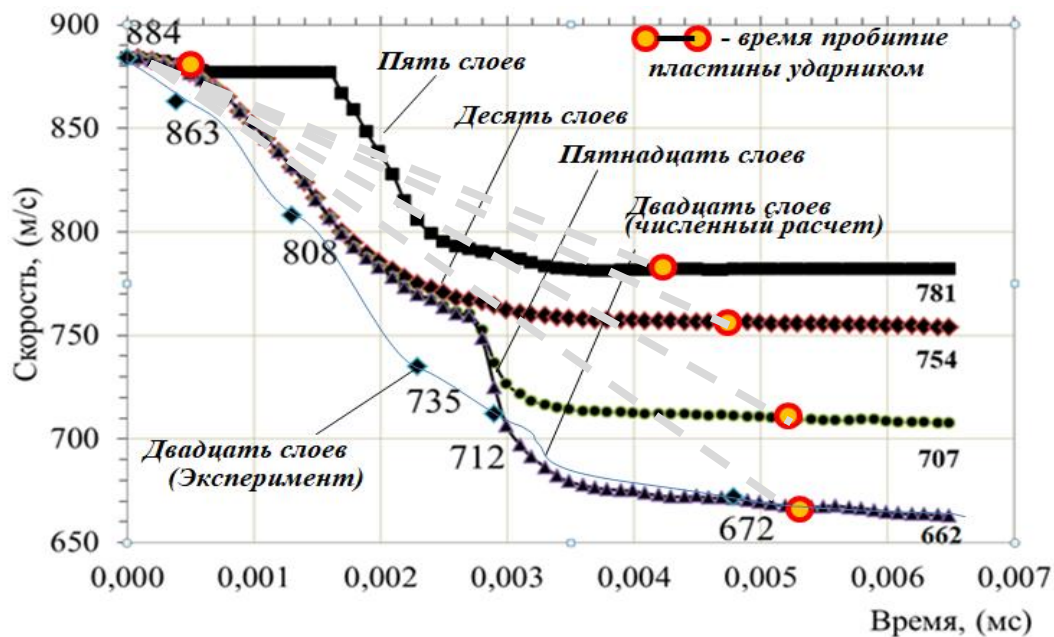


Рисунок 4 – Зависимость скорости ударника от времени: 5, 10, 15, 20 слоев стеклопластика, начальная скорость 884 м/с

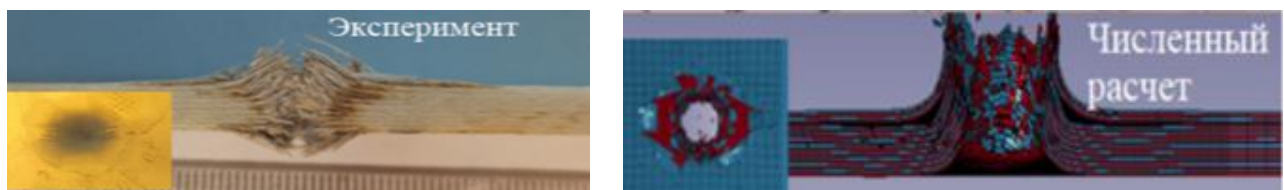
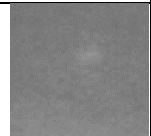
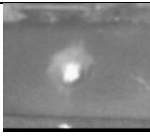
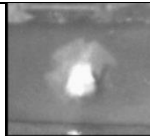
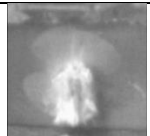
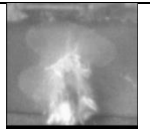
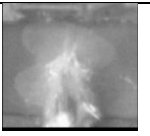
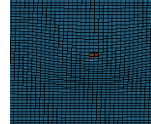
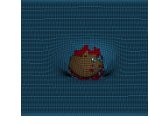
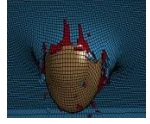
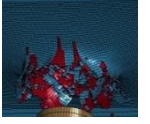


Рисунок 5 – Область повреждений образцов после испытаний, сравнение эксперимента с численным расчетом

Таблица 1. Покадровый анализ дефектов

Пластина из стеклопластика 20 слоев $[0,90]_{10}$ при ударе скоростью 884 м/с						
Номер кадра	52	86	103	260	306	357
Видеосъемка результатов испытаний						
Численная модель						

В третьей главе разработана расчетно-экспериментальная методика для снижения скорости ударника за счет оптимального армирования многослойных КМ и определения площади дефектов. В качестве примера рассмотрены пластины (размер 120x170 мм) из стеклопластика, состоящие из 10, 20 слоев, толщина 1 слоя равна 0,19 мм. Ударник имеет геометрию пули калибра 9x19 Luger FMJ, вес – 7.46 г, скорость до удара – 346 м/с.

Созданы конечно-элементные (КЭ) модели пластины из многослойного КМ и ударника. Для численного моделирования и расчета использована программа ANSYS Workbench 19 r3, модули Workbench Ls-dyna для расчета на удар и Composite prepost - для моделирования слоев КМ. Задача оптимизации, обеспечивающая снижение скорости ударника в зависимости от угла укладки волокон в слое, решена с использованием генетического алгоритма и квадратичного программирования (модуль ANSYS Optimization). Задача ограничена квазистатическим условием разрушения, скоростью ударника, прочностными характеристиками многослойного КМ, которые получены в главе 2.

Разработана автоматизированная процедура выбора угла укладки волокон в слое. Например, на рисунке 6 представлен график определения оптимального угла укладки волокон 10-слойной пластины в каждом слое. Получено 405 вариантов углов укладки волокон для каждого слоя пластин из 10 слоев, выбраны три варианта оптимального армирования для снижения скорости ударника (рис. 6).

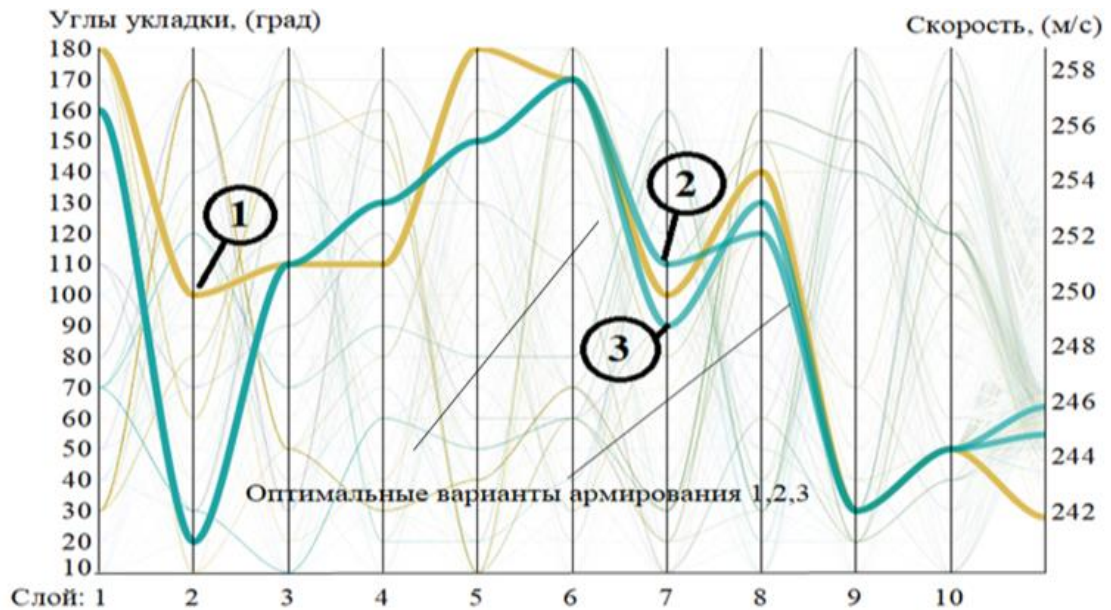


Рисунок 6 – График оптимизации углов укладки слоев пластины:

вертикальная линия – углы укладки от 10° до 180° для каждого из 10 слоев;
 вертикальная линия – скорость (м/с); горизонтальная линия – номер слоя КМ;
 варианты 1–3, максимально снижают скорость ударника

Скорость ударника после удара (остаточная скорость) меняется в пределах от 259 до 242 м/с, по сравнению до удара (346 м/с.), что составляет снижение в среднем на 25–31% в зависимости от армирования многослойных КМ. Выбраны три варианта, максимально снижающие скорость ударника.

В таблице 2 представлены результаты моделирования многослойной пластины из КМ с оптимальной укладкой волокон в слое (вариант 1) и стандартной укладкой волокон ($[90]_{10}$ и $[90]_{20}$) для снижения скорости после удара.

Таблица 2. Результаты моделирования многослойной пластины

Скорость ударника до пробития 884 м/с				
Укладка волокон в слое	10 слоев стеклопластика		20 слоев стеклопластика	
	Остаточная скорость (м/с)	Снижение скорости %	Остаточная скорость (м/с)	Снижение скорости %
Стандартная	754	15	662	25
Оптимальная	725	18	575	35

Сделан анализ повреждения пластины (рис.7) на примере пластины из 10 слоев, скорость ударника – 346 м/с: индикатор синего цвета – отсутствие повреждений; индикаторы желтый, зеленый – межслойные дефекты; красный

индикатор – полное разрушение. Рассмотрены пластина 1 с укладкой волокон по варианту 1 (рис.7 – а) и пластина 2 (рис.7 – б) с укладкой слоев $[90]_{10}$. Площадь повреждения пластины 1 (межслойные дефекты, индикатор) составляют 76 % всей площади пластины, скорость после пробития $v_{ост} = 235$ м/с; площадь повреждения пластины 2 составляет до 45%, скорость после пробития $v_{ост} = 259$ м/с. Каждый слой снижает удар, при этом увеличивается зона межслойного дефекта, что соответствует результатам экспериментальных исследований. Площадь полного разрушения пластины 2 на 14% больше, чем площадь полного разрушения пластины 1. Разрушение пластины 2 со стандартной укладкой волокон в слое сильно локализовано, что подтверждает ограниченную работу пластины для снижения скорости ударника.

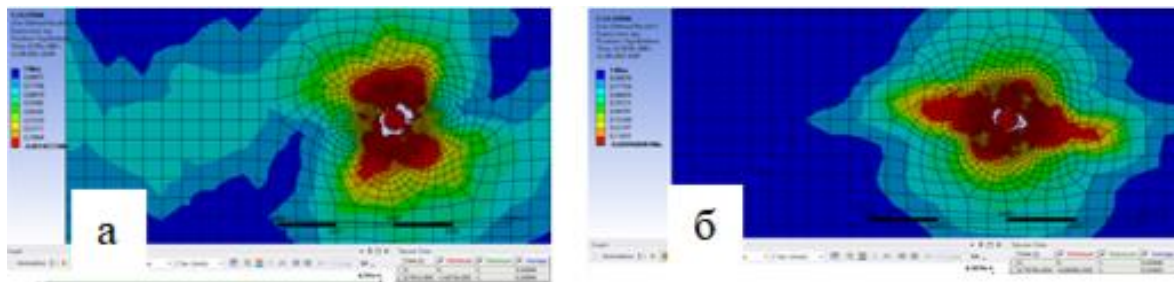


Рисунок 7 – Площадь повреждений пластин: а – вариант 1 оптимальная укладка слоев пластины; б – вариант 2 стандартная укладка слоев пластины $[90]_{10}$

Для проверки корректности численных моделей были проведены натурные испытания на скоростной удар (скоростью 346 м/с) образцов 10-слойной пластины. Были определены площадь повреждений и скорость ударника после пробития. Результаты экспериментов показали, что скорость до удара 346 м/с снижается в среднем до скорости 250 м/с после пробития пластины. По численному расчету скорость после пробития снижается до 238 м/с, сходимость результатов составляет 5–6%.

Разработанная методика оптимального армирования многослойных КМ рассмотрена на примере многослойной обшивки консоли крыла беспилотного летательного аппарата (БПЛА) из КМ.

В четвертой главе определены критическая и разрушающая нагрузки локального тонкостенного расслоения, полученного при взаимодействии

композиционной пластины с высокоскоростными ударниками. Локальное расслоение рассматривается как тонкая осесимметричная пластина, защемленная по контуру и подвергнутая равномерно распределенной нагрузке интенсивностью q_x, q_y , соответствующей основной нагрузке многослойной композиционной пластины $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ (рис. 8).

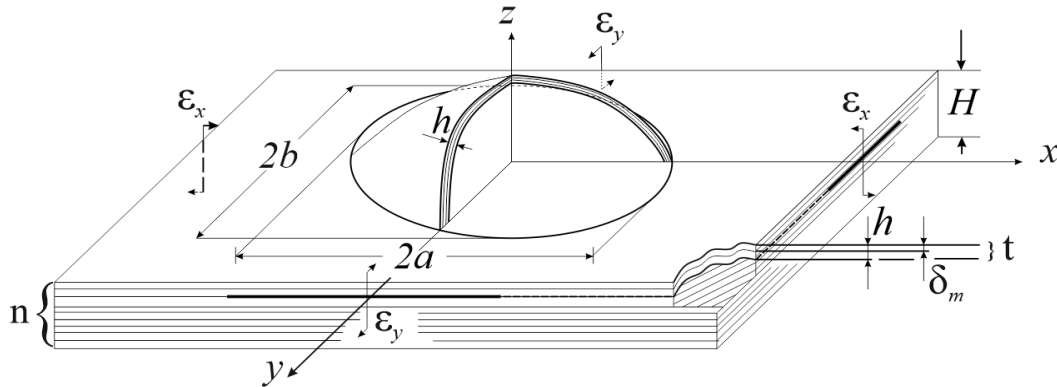


Рисунок 8 – Схематическое изображение локального расслоения композитного образца: h — толщина расслоения; H — толщина основной части пластины; a, b — полуоси расслоения; m — количество слоев в пакете, δ_m — толщина m -го слоя, t — количество слоев расслоения

Границы локального расслоения заданы уравнением $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, где h удовлетворяет условию $h \ll a, b$. Многослойная пластина в области расслоения состоит из двух частей: расслоившегося слоя (верхняя часть толщиной h) и слоя, расположенного ниже расслоения (нижняя часть толщиной $H - h$). Для определения упругих характеристик многослойного пакета пластины и локального расслоения воспользуемся соотношениями для однонаправленного композитного материала (ОКМ), которые отражают вклад каждого компонента пропорционально его объемной доле — так называемое правило смесей. Тогда относительное объемное содержание в ОКМ волокна f_b и матрицы f_m суммарно равно единице ($f_b + f_m = 1$). На растровом электронном микроскопе JSM-6510LV JEOL был получен снимок стеклянной нити в поперечном сечении. Объемная доля волокон в стеклонити f_b , имеющих диаметр порядка 6 мкм, составляет 70%.

Находим значения упругих постоянных ОКМ через упругие постоянные и объемные доли компонентов по следующим выражениям:

$$E_1 = f_B E_B + f_M E_M; \quad E_2 = \frac{E_B E_M E_1}{E_1 [f_B E_M + f_M E_B] - f_B f_M (\mu_M E_B - \mu_B E_M)^2}; \quad G_{12} = \frac{G_B G_M}{f_B G_M + f_M G_B};$$

$$\mu_{12} = f_B \mu_B + f_M \mu_M; \quad \mu_{21} = \frac{\mu_{12} E_2}{E_1},$$

где E_1, E_2 — модуль упругости вдоль и поперек направления армирования; G_{12} — модуль сдвига в плоскости слоя; μ_{12}, μ_{21} — коэффициенты Пуассона поперечных деформаций. Полученные аналитические значения упругих постоянных ОКМ уточнены численными расчетами, проведенными в программном комплексе ANSYS Mechanical, и экспериментальными данными. По контуру дефекта заданы усилия, соответствующие деформациям основы

$$q_x = \frac{\varepsilon_x E_x h}{1 - \mu_{xy}}; \quad q_y = \frac{\varepsilon_y E_y h}{1 - \mu_{yx}}. \quad \text{где } \mu_{xy}, \mu_{yx}, E_x, E_y \text{ — упругие характеристики}$$

многослойного пакета, которые определены по известным характеристикам жесткости входящих в него отдельных слоев: $C_{j,s}^m$ — жесткостные характеристики m -го слоя, зависящие от угла ориентации волокон φ однонаправленного слоя, модуля сдвига, модулей упругости, коэффициента Пуассона.

Перемещения, которые описывают переход пластины в новое отклоненное состояние от начального состояния равновесия, представим в виде: $w(x, y) = \eta w_1(x, y)$; $u(x, y) = \eta^2 u_2(x, y)$, $v(x, y) = \eta^2 v_2(x, y)$, где x, y, z — направление осей, соответствующее компонентам перемещений u, v, w ; η — параметр, зависящий от уровня нагружения пластины.

Изменение полной потенциальной энергии $\Delta \mathcal{E}$ для тонких расслоений при отклонении от начального плоского состояния определяется выражением

$$\Delta\mathfrak{E} = \eta^2 \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(x/a)^2}} D \left\{ \left(\frac{d^2 w_1}{dx^2} + \frac{d^2 w_1}{dy^2} \right)^2 + \eta^2 2(1-\mu_{xy}) \left[\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w_1 \partial^2 w_1}{\partial x^2 \partial y^2} \right] \right\} dy dx -$$

$$-\eta^2 \oint_{S_2} (u_2 q_x + v_2 q_y) dS_2,$$

где $D = \frac{E_x h^3}{12(1-\mu_{xy}\mu_{yx})}$ — цилиндрическая жесткость многослойного расслоения;

S_2 — граница отслоения, $w_1(x, y), u_2(x, y), v_2(x, y)$ перемещения определены.

Из условия $\Delta\mathfrak{E} = 0$ находим критическую нагрузку, которую для удобства можно представить в виде:

$$\varepsilon_{кр} = \frac{\frac{1}{2} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(x/a)^2}} D \left\{ \left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2} \right)^2 + 2(1-\mu_{xy}) \left[\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^4 w_1}{\partial x^2 \partial y^2} \right] \right\} dy dx}{\frac{E_x h}{1-\mu_{xy}} \left[\oint_{S_2} u_2 dS_2 + \mu \oint_{S_2} v_2 dS_2 \right]}.$$

Элементарная работа сил сопротивления продвижению фронта расслоения равна $dA_\gamma = \pi(a\Delta\mathfrak{e} + \mathfrak{e}\Delta a + \Delta a\Delta\mathfrak{e})2\gamma$. Поверхностные слои получили деформацию $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$, $\varepsilon_x = \varepsilon$, $\varepsilon_y = \mu_{xy}\varepsilon_x$. Определяем потенциальную энергию деформации элемента конструкции с расслоением как функцию размеров расслоения

$$U = \frac{Eh}{2(1-\mu^2)} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(x/a)^2}} (1+3\mu^2)(\varepsilon_{кр}^2 - \varepsilon^2) dy dx + \frac{F}{T}(\varepsilon_{кр}\varepsilon - \varepsilon_{кр}^2).$$

Определим обобщенные силы, продвигающие отслоения G_a, G_b , с помощью численного дифференцирования потенциальной энергии по размерам отслоения при бесконечно малых приращениях $\Delta a, \Delta b$.

$$G_a = \frac{Eh}{2(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial a} \left\{ \frac{\pi ab(1+3\mu^2)}{4} \varepsilon^2 - \left[\frac{\pi ab(1+3\mu^2)}{4} - \frac{F}{T} \right] \varepsilon_{кр}^2 - \frac{F}{T} \varepsilon_{кр} \varepsilon \right\};$$

$$G_b = \frac{Eh}{2(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial b} \left\{ \frac{\pi ab(1+3\mu^2)}{4} \varepsilon^2 - \left[\frac{\pi ab(1+3\mu^2)}{4} - \frac{F}{T} \right] \varepsilon_{кр}^2 - \frac{F}{T} \varepsilon_{кр} \varepsilon \right\}.$$

Исследуем характерные особенности роста дефектов при сжатии основной пластины: $\varepsilon_{кр}$ — критическое значение нагружения, ε_γ — кривая разрушения

(рис. 9). Между критической кривой и кривой разрушения – область появления и подрастания дефектов.

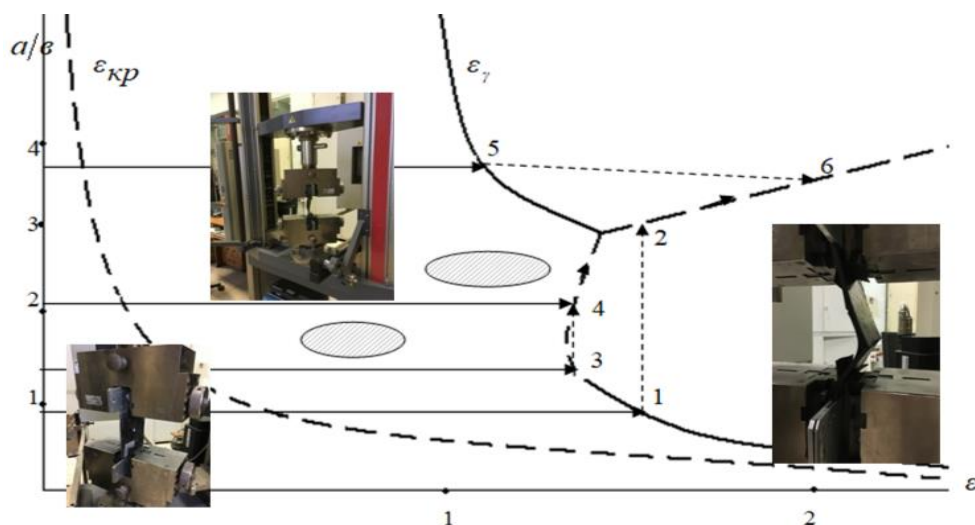


Рисунок 9 – График роста дефектов расслоений

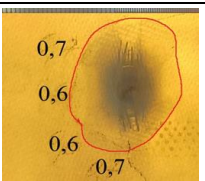
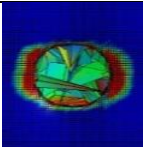
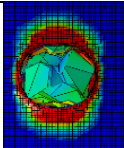
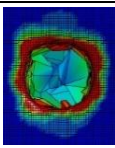
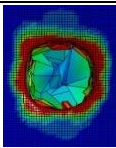
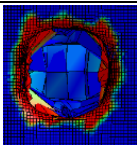
В пятой главе сделана оценка разрушения многослойных композитов под действием ударных нагрузок, определены площади внутреннего расслоения образцов и глубина залегания дефектов. Особое место с точки зрения диагностики занимают конструкции из КМ в силу сложности их технологического изготовления, анизотропности материала. Поэтому для качественного анализа дефектоскопии образцов после ударного повреждения в работе применяется комплексный контроль, включающий несколько методов неразрушающего контроля: визуальный контроль, ультразвуковую дефектоскопию и численное моделирование.

Для оценки внутренних повреждений при ударных нагрузках использовался прибор для ультразвуковой дефектоскопии КМ ELISA GMIUC002-14. Прибор определил границы повреждения и глубину дефекта с точностью до слоя, при этом были использованы два ультразвуковых датчика, работающих на частоте 10 МГц диаметром 6,35 мм и 9,5 мм.

Например, для 20-слойной пластины из стеклопластика со стороны входного отверстия глубина залегания дефекта определяется на 2,9 – 3,4 мм, что соответствует 13-му и 16-му слоям композита, площадь расслоения – 5,7 см². Со стороны выходного отверстия глубина залегания дефекта определяется на 0,5 мм, что соответствует расположению дефекта между 18-м и 19-м слоями,

площадь расслоения – $8,2 \text{ см}^2$. В таблице 3 представлены результаты определения площади расслоения (красная линия – границы дефекта) и глубина залегания дефекта (цифровое обозначение), полученные ультразвуковым методом и визуальным контролем.

Таблица 3. Результаты определения площади расслоения и глубины залегания дефекта

Пластина из 5 слоев, скорость удара 346 м/с				
Образец № 31	Ультразвуковой метод		Визуальный контроль	
	Вход	Выход	Вход	Выход
Глубина залегания дефекта (мм)				
Площадь $S(\text{см}^2)$	1,27	6,0	1,63	5,78
Численное моделирование по слоям, $S=6 \text{ см}^2$, межслойные дефекты				
1–2	2–3	3–4	4–5	Выход
				

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена задача, связанная с численным моделированием динамических процессов многослойных КМ при локальном ударе, и получены следующие результаты:

1. Выполнен цикл экспериментальных исследований пластин из многослойных КМ при взаимодействии с высокоскоростными ударниками. Предложена методика виртуальных испытаний на основе комплексного экспериментального исследования и численного моделирования. Установлено, что скорость ударника, размеры внутренних экспериментальных повреждений пластины, снятые высокоскоростной камерой, совпадают на 95-98% с численными моделями.

2. Разработана расчетно-экспериментальная методика оптимального армирования многослойных КМ. Установлено, что при оптимальном

армировании скорость пробития уменьшается за счет увеличения площади межслойных дефектов в материале. Результаты экспериментов и численных расчетов показали, что скорость ударника снижается от 31% до 56% после пробития пластины, при этом наблюдается увеличение площади межслойных дефектов до 45%.

3. Предложено аналитическое решение задачи устойчивости и разрушения тонкостенной сжатой пластины из многослойных КМ с межслойными сквозными дефектами, полученными в результате высокоскоростного удара. Определены жесткостные характеристики многослойных КМ по экспериментально полученным объемным долям армирующих элементов и связующего.

4. Получены результаты комплексного исследования внутренних дефектов в образцах после ударных повреждений диагностическими и численными методами. Определены площади расслоения и глубина залегания дефектов различными способами.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях и журналах из перечня ВАК

1. Бохоева Л.А. Влияние добавления нанопорошков на прочность многослойных композитных материалов/ Л.А. Бохоева, А.Б. Балданов, В.Е. Чермошнцева [и др.]// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. –2021. Т.87, №8. –С. 42-50.
2. Бохоева Л.А. Математическое моделирование потери устойчивости локальных расслоений, полученных в результате скоростного удара / Л.А. Бохоева, А.Б. Балданов, Е.В. Рогов// Инженерный журнал: наука и инновации. – 2022. № 12(132). –С. 1–14
3. Моделирование оптимальной многослойной пластины из композиционных материалов для снижения скорости после удара/ Л.А. Бохоева, В.Е. Рогов, А.Б. Балданов, Ю.Н. Иванов// Машиностроение и инженерное образование. –2022. № 3–4 (70). –С. 3–11.
4. Бохоева Л.А., Балданов А.Б., Рогов В.Е. Особенности межслойного разрушения при ударном нагружении композиционных материалов с переменным углом укладки слоев// Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. –2024. № 2. С. 50–60.
5. Бохоева Л.А., Балданов А.Б., Рогов В.Е. Прочность кольцевых образцов из слоистых композиционных материалов с межслойными дефектами//

Фундаментальные проблемы современного материаловедения. –2013. Т.10, № 1. С.87–92.

6. Бохоева Л.А., Балданов А.Б., Зайцев Б.А., Моделирование лопасти ветрогенератора из композиционных материалов// Вестник ВСГУТУ.–2013. № 2(41).-С.24–29.

7. Рогов В.Е., Балданов А.Б., Курохтин В.Ю. Компьютерное моделирование несущих стержневых элементов мобильных зданий из полимерных композиционных материалов// Интернет-журнал Науковедение. –2017. Т. 9, № 2.-С.1-7.

Публикации в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science:

8. Determination of the Optimal Structure of a Layered Composite Material for Maximum Strength Characteristics/ L. A. Bokhoeva, I. O. Bobarika, A. B. Baldanov [et al.]. Materials Science Forum. –2021; 1040: 124–131p -DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.124

9. Л. А. Бохоева, А.Б. Балданов, А.С. Чермошенцева. Разработка оптимальной конструкции многослойной консоли крыла беспилотного летательного аппарата с экспериментальным подтверждением// Вестник Московского авиационного института. –2020. Т. 27, № 1. С. 65–75. DOI: 10.34759/vst-2020-1-65-75.

10. Baldanov A.B., Bokhoeva L.A., Shalbuev D.V., Tumurova T.B. Collagen Based Bio-Additives in Polymer Composites// Nanotechnologies in Construction. –2022; 14(2): 137–144. -DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-137-144>.

11. Bokhoeva L.A., Rogov V.E. Bochektueva E.B., Baldanov A.B., Shatov M.S., Batuev Ts.A. Use of nano-sized components in multilayer composite materials.// Nanotechnologies in construction. –2024; 16(2): 180–188. -DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-2-180-188>.

12. Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Bochektueva E.B., Baldanov A.B., Ivanov R.P. Development of armored products made from multilayer composite plates// Nanotechnology in Construction. –2025; 17(2):201–209. -DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-201-209>

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, патенты (свидетельства) на полезную модель

13. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020614269 РФ Определение геометрических характеристик усталостных трещин методами цифровой обработки изображений./ Заявка № 2019666879 от 16.12.2019: опубл. 27.03.2020/ С.А. Базарон, Т.Ц. Дамдинова, Л.А. Бохоева, [и др.].

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024661132 РФ. Определения жесткостных характеристик многослойного композиционного материала: Заявка № 2024619405 от 26.04.2024: опубл. 15.05.2024/ В.А. Титов, Л.А. Бохоева, А.Б. Балданов [и др.].

15. Патент РФ на полезную модель № 123429. Каркас юрты — сборно-разборного жилища: заявл. 01.08.2012: опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36/ А.Б. Балданов, Л.А. Бохоева.

Публикации в других изданиях и журналах

16. Балданов А.Б. Моделирование каркаса юрты из композиционных материалов// Ползуновский альманах. –2013. № 2. С.74-77.
17. Рогов В.Е. Балданов А.Б. Оценка прочности каркаса юрты из композиционного материала// Механика конструкций и материалов (композиционные материалы и наноматериалы): сборник научных трудов. Улан-Удэ, 18-22 апреля 2016 г. Улан-Удэ, ВСГУТУ, –2016. Вып.1. С.90-99.
18. Рогов В.Е. Балданов А.Б. Оценка прочности каркаса юрты из композиционного материала с использованием CAD/CAE-систем// Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. –2016. № 2-3. С. 57-62. DOI 10.18101/2306-2363-2016-2-3-57-62.
19. Influence of modification by nanodispersed powders on layered composite aerospace hulls and protective shields / A.S. Chermoshentseva, A.M. Pokrovskiy, L.A. Bokhoeva [et al.]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Novosibirsk. Vol. 560. – Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, –2019. – P. 012178. – DOI 10.1088/1757-899X/560/1/012178.
20. Bokhoeva L.A., Baldanov A.B., Kurokhtin V.Y. Strength evaluation of the relocatable building made of the polymer composite material//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, –2019. – Т. 684. – №. 1. – С. 012026. DOI 10.1088/1757-899X/684/1/012026.
21. Bokhoeva L.A., Baldanov A.B., Chermoshentseva A.S. Development of optimal modelling of thin-walled elements in the form of a shell made of composite materials //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, –2021. – Т. 1061. – №. 1. – С. 012010. DOI 10.1088/1757-899X/1061/1/012010
22. Расчет прочности слоистых плоских экранов при ударе с использованием CAD/CAE-систем/ Л.А. Бохоева, Е.Б. Бочектуева, А.Б. Балданов, В.Ю. Курохтин// III Международная конференция молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций: материалы конференции (Улан-Удэ, 2019 г.). Улан-Удэ, 2019. С. 281–287.
23. Балданов А.Б. Обеспечение жесткости консоли крыла беспилотного летательного аппарата за счет оптимального угла укладки волокон / Л.А. Бохоева, А.Б. Балданов, В.Е. Рогов// III Международная конференция молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций: сборник статей. Улан-Удэ, 2019. С. 277–281.
24. Балданов, А.Б. Определение устойчивости стержневых элементов мобильного здания из полимерных композиционных материалов / А.Б. Балданов, Е.Е. Кибирева, В.Е. Рогов// Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник научных трудов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Том 6. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 16-18.
25. Моделирование и изготовление пресс-форм для объемных деталей из композиционных материалов/ Л.А. Бохоева, А.В. Перевалов, А.Б. Балданов, А.С. Чермошенцева// Образование и наука: Сборник статей национальной научно-практической конференции, Улан-Удэ, 13–17 апреля 2020 г. – С.19-27.
26. Экспериментальное исследование образцов из слоистых композиционных материалов на прочность при добавлении нанопорошков/ Л.А. Бохоева, В.Е.

- Рогов, А.С. Чермошенцева, А.Б. Балданов// Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ – 2020): сборник трудов V Международной научно-технической конференции в дистанционном формате, 2020. С. 53–56.
27. Разработка мыса хоккейного ботинка из полимерного композиционного материала/ Д.Н. Мороз, А.Б. Балданов, А.Ж. Цыденова, А.Б. Жаргалова// Механики XXI века. – 2021. – № 20. – С. 139-145
28. Балданов А.Б. Моделирование процессов деформирования и разрушения слоистых композиционных материалов при локальном ударе / А.Б. Балданов, Л.А. Бохоева, А.С. Бочектуева// Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9, № 1. С. 2–7.
29. Испытание на удар многослойных композиционных образцов/ Л.А. Бохоева, А.Б. Балданов, А.В. Перевалов [и др.]// VIII Международная конференция проблемы механики современных машин: сборник статей. Улан-Удэ, 2022. С. 412–416.
30. Балданов А.Б. Численное исследование потери устойчивости полимерного композиционного материала/ Л.А. Бохоева, А.Б. Балданов// VIII Международная конференция проблемы механики современных машин: сборник статей. Улан-Удэ, 2022. С. 139–142.
31. Программа по автоматическому определению жесткостных характеристик многослойного композиционного материала/ Л.А. Бохоева, В.А. Титов, С.А. Базарон, А.Б. Балданов// Образование и наука: Материалы Национальной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Машиностроительного факультета ВСГУТУ. – Улан-Удэ, 2023. – С. 108-113
32. Разработка и программная реализация определения жесткостных характеристик многослойного композиционного материала/ В.А. Титов, Л.А. Бохоева, А.Б. Балданов, М.С. Шатов// Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering: Материалы XVI Международной научно-практической конференции. – Иркутск: ИрННТУ, 2023. – С. 96–100.
33. Балданов А.Б. Влияние угла укладки волокон в слое многослойных пластин на размеры повреждений, полученных при ударных воздействиях/ А.Б. Балданов, Л.А. Бохоева, В.А. Титов// Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering: Материалы XVI Международной научно-практической конференции. – Иркутск: ИрННТУ, 2023. – С. 121–124.
34. Балданов, А.Б. Прочность многослойных композиционных материалов после испытания на удар/ А.Б. Балданов, А.С. Чермошенцева, Р.П. Иванов// XXXVI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС - 2024): Сборник трудов конференции. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2024. – С. 50-54.
35. Балданов А.Б. Численное моделирование процессов деформирования и разрушения композитных пластин при локальном ударе. В книге: Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. Материалы XVIII международной конференции. Екатеринбург, 2024. С. 200.